

УДК 523.9

Поперечные градиенты продольного магнитного поля в активных областях с разным уровнем вспышечной продуктивности: различные подходы к вычислению, динамика и вероятные критические значения

Ю.А. Фурсяк

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
yuriy_fursyak@mail.ru

Поступила в редакцию 4 октября 2022 г.

Аннотация. Основной задачей исследования является анализ величины и динамики поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля в активных областях (АО) с различным уровнем вспышечной продуктивности. В работе использованы данные о пространственном распределении на уровне фотосферы Солнца B_z -компоненты вектора магнитного поля, предоставляемые инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO). Для анализа отобраны 13 АО: 6 областей с низкой активностью и 7 с высокой, из них две области с дополнительным всплытием магнитного потока. Мониторинг каждой из областей осуществлялся на протяжении 3–5 суток в пределах 30–35 гелиографических градусов относительно центрального меридиана. Рассмотрены два подхода к вычислению градиента продольного магнитного поля – современный, требующий магнитографических данных высокого пространственного разрешения, и классический. Для каждого подхода определены параметры, характеризующие градиент продольного магнитного поля в АО. Для современного подхода это средняя по АО величина поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, для классического подхода – максимальное значение поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля совокупности пар пятен в АО ($\max(\nabla_{\perp} B_z)$). Динамика выбранных параметров сопоставлена с уровнем вспышечной продуктивности АО. Показано, что: 1. Существуют пороговые значения параметров, характеризующих градиент продольного магнитного поля АО. Для величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ критическое значение равно 0.08 Гс км^{-1} , а для параметра $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ – 0.115 Гс км^{-1} . 2. Первые мощные вспышки рентгеновских классов М и выше наблюдаются в АО через 23–25 часов после превышения вышеуказанными параметрами соответствующих критических значений.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля, активные области, солнечная активность

1 Введение

Изучение магнитных полей на Солнце и их динамики является первым, и, несомненно, крайне важным шагом в изучении активных процессов и явлений, наблюдаемых в солнечной атмосфере.

Первые в мире измерения магнитных полей солнечных пятен были выполнены Дж.Э. Хэйлом в 1908 году с использованием спектрографических данных башенного солнечного телескопа обсерватории Маунт-Вилсон (Hale, 1908). В дальнейшем появилась необходимость измерения и более слабых локальных магнитных полей. Однако первые попытки таких измерений, выполненные с применением фотоэлектрических методов Дж.Э. Хэйлом и коллегами в 1933 году, не увенчались успехом.

Развитие технологий привело к появлению в 50-х годах 20-го века и дальнейшему развитию солнечных магнитографов. Первый магнитограф был создан в 1952 году Г. Бэбкоком (Babcock, 1953). Через несколько лет аналогичный прибор был смонтирован на башенном солнечном телескопе БСТ-1 Крымской астрофизической обсерватории (Никулин и др., 1958), а уже в середине 60-х годов магнитографы появляются во многих крупных обсерваториях и институтах, занимающихся изучением

Солнца: ИЗМИРАН (Иошпа, Обридко, 1965), Пулковской обсерватории (Ихсанов, Платонов, 1967), СибИЗМИР (Кузнецов и др., 1966), обсерваториях Клаймакс (Lee et al., 1965), Китт-Пик (Livingston, 1968) и др.

С появлением первых магнитографов начинается систематическое изучение магнитных полей в атмосфере Солнца. Уже во второй половине 50-х годов 20-го века на основе достаточно большого наблюдательного материала был сделан вывод о тесной связи магнитных полей с нестационарными процессами в солнечной атмосфере (Северный, 1956, 1957 и др.). Как отмечал А.Б. Северный, даже “простейшее рассмотрение баланса энергии показывает, что внутри солнечной атмосферы нет другого источника энергии вспышек, кроме энергии магнитного поля” (Северный, 1988). Исследователями определяются параметры магнитного поля, которые можно оценить, не прибегая к сложным математическим вычислениям, и в то же время легко связать с динамикой вспышечной продуктивности активной области (АО). Наиболее простыми из подобных величин являются напряженность магнитных полей пятен в группе, сложность магнитной конфигурации, магнитный поток и некоторые другие. Более сложным параметром является градиент магнитного поля. Причем речь здесь идет только о поперечной составляющей продольного магнитного поля, поскольку даже в наши дни существуют значительные трудности в измерении магнитных полей на двух и более высотах в солнечной атмосфере. Хотя благодаря появлению многоканальных вектор-магнитографов (напр., Брунс и др., 1965; Никулин, 1967) подобные работы в свое время и проводились, лишь малое их количество содержит информацию о величинах вертикальной составляющей градиента продольного магнитного поля (напр., Котов, 1970; Барановский, Степанов, 1959; Houtgast, Sluiter, 1948). Есть и теоретические исследования (см., напр., Leroy, 1962; Северный, 1965; Иошпа, Могилевский, 1965), в которых данные о вертикальной составляющей градиента продольного магнитного поля были получены из уравнения $\text{div } \vec{B} = 0$. Однако систематические исследования на достаточно большом статистическом материале в данном направлении отсутствуют вовсе.

К концу 50-х годов 20-го века группой крымских астрономов во главе с А.Б. Северным были изучены поперечные градиенты продольного магнитного поля и их динамика перед и после солнечных вспышек. Получены важные результаты. Так, в работе А.Б. Северного (1958) отмечено, что “вспышки возникают в нейтральных точках (областях) магнитного поля групп пятен при значительном градиенте поля возле этих точек”. В 1959 году на основе накопленного наблюдательного материала был произведен статистический анализ и обнаружено, что мощные вспышечные процессы возникают в областях с градиентом продольного магнитного поля, превышающим значение 0.1 Гс км^{-1} (Северный, 1960). Эти результаты далее были подтверждены в ряде исследований (Гопасюк и др., 1963; Зверева, Северный, 1970 и др.). Тесная связь высоких градиентов поля с мощными эруптивными событиями в солнечной атмосфере была обнаружена и по результатам наблюдений в других обсерваториях, например в Медонской (Avignon et al., 1964; Caroubalos, 1964). Здесь вместо градиента использовалось отношение d/D , где d – расстояние между пятнами, D – диаметр большего пятна. В конце 70-х годов 20-го века пороговое значение градиента продольного магнитного поля в 0.1 Гс км^{-1} было заложено советскими астрономами как один из параметров, позволяющих сделать точный (с оправдываемостью более 80%) прогноз вспышечной продуктивности АО с заблаговременностью 1–3 дня (Severny et al., 1979; Алтынцев и др., 1982).

Инструменты для измерения магнитных полей на Солнце, создаваемые в последние десятилетия, особенно установленные на космических аппаратах, обладают целым рядом преимуществ по сравнению с магнитографами ранних моделей. В первую очередь это возможность круглосуточного мониторинга Солнца с высоким пространственным и временным разрешением. Так, разрешающая сила магнитографа Бэбкока составляла порядка $38'' \times 70''$, а магнитографа Крымской астрофизической обсерватории – $15'' \times 30''$ (около $11000 \times 22000 \text{ км}$ на уровне фотосферы Солнца). В то же время, например, инструмент Helioseismic and Magnetic Imager (HMI, Scherrer et al., 2012) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO, Pesnell et al., 2012) имеет пространственное разрешение на уровне солнечной фотосферы порядка $0.5''$ ($\approx 360 \text{ км}$), а спектрополяриметр SOT-SP/Hinode (Kosugi et al., 2007) – порядка $0.3''$ ($\approx 220 \text{ км}$).

Учитывая преимущества современных инструментов для изучения Солнца, было бы интересно повторить ранние исследования в области анализа структуры и динамики градиентов продольного магнитного поля. Здесь ставится задача на сравнительно небольшой репрезентативной выборке АО с разным уровнем вспышечной продуктивности изучить динамику величины поперечной составляющей

щей градиента продольного магнитного поля и определить пороговые значения величины градиента, сравнив их с найденной ранее величиной в 0.1 Гс км^{-1} .

2 Данные наблюдений

Основной объем работы выполнен на данных инструмента HMI/SDO, которые доступны на сайте Joint Science Operation Center¹ (JSOC). Используются SHARP (Spaceweather HMI Active Region Patch) (Bobra et al., 2014) магнитограммы пространственного распределения вертикальной компоненты (B_z) вектора магнитного поля в фотосфере (цилиндрические координаты, серия данных hmi.sharp_sea_720s) с временным разрешением 12 минут.

Дополнительно использованы данные спутника мониторинга погоды GOES-15² о потоке рентгеновского излучения в диапазоне длин волн $1-8 \text{ \AA}$ на орбите Земли, а также информация о параметрах активных областей и вспышках в них, размещенная на сайте Лаборатории солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ³.

Для анализа были отобраны 13 АО 24-го цикла солнечной активности с разным уровнем вспышечной продуктивности. Следует отметить, что здесь под активной областью понимается группа солнечных пятен. Анализируемые области разделены на три группы. Для областей с низкой активностью (здесь и далее в тексте под активностью АО понимается именно вспышечная активность) характерны вспышки рентгеновских классов C или M не выше M5.0. Всего проанализировано 6 таких областей. Для областей с высокой активностью (проанализировано 5 АО) характерны либо серия вспышек рентгеновских классов M5.0 и выше, либо одна и более вспышек рентгеновского класса X. В третью группу (две АО) вошли области с высокой активностью, в которых за время мониторинга наблюдалось существенное (в 5 и более раз) нарастание магнитного потока.

Таблица 1. Информация об исследуемых АО, их вспышечной активности и величинах поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля

| № п/п | Номер области (NOAA) | Время мониторинга АО | Наиболее мощная вспышка в АО | FI | $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, Гс км ⁻¹ | $\overline{\max(\nabla_{\perp} B_z)}$, Гс км ⁻¹ |
|--|----------------------|-------------------------|------------------------------|--------|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Области с низкой активностью | | | | | | |
| 1 | 11391 | 07.01.2012 – 10.01.2012 | C2.2 13.01.2012 | 0.30 | 0.090 | 0.084 |
| 2 | 11899 | 17.11.2013 – 20.11.2013 | M1.1 23.11.2013 | 3.85 | 0.070 | 0.004 |
| 3 | 12381 | 07.07.2015 – 10.07.2015 | M1.7 06.07.2015 | 5.25 | 0.088 | 0.088 |
| 4 | 12480 | 10.01.2016 – 14.01.2016 | C1.7 15.01.2016 | 0.23 | 0.073 | 0.013 |
| 5 | 12494 | 05.02.2016 – 07.02.2016 | C5.2 04.02.2016 | 1.77 | 0.084 | 0.095 |
| 6 | 12674 | 03.09.2017 – 06.09.2017 | C5.2 30.08.2017 | 0.76 | 0.093 | 0.112 |
| Области с высокой активностью | | | | | | |
| 7 | 11283 | 04.09.2011 – 07.09.2011 | X2.1 06.09.2011 | 45.61 | 0.087 | 0.206 |
| 8 | 11890 | 07.11.2013 – 10.11.2013 | X3.3 05.11.2013 | 55.63 | 0.096 | 0.631 |
| 9 | 12158 | 09.09.2014 – 12.09.2014 | X1.6 10.09.2014 | 13.00 | 0.095 | 0.118 |
| 10 | 12192 | 22.10.2014 – 25.10.2014 | X3.1 25.10.2014 | 101.64 | 0.120 | 0.335 |
| 11 | 12297 | 11.03.2015 – 14.03.2015 | X2.2 11.03.2015 | 46.32 | 0.095 | 0.792 |
| Области с дополнительным всплыванием магнитного потока | | | | | | |
| 12 | 11158 | 12.02.2011 – 15.02.2011 | X2.2 15.02.2011 | 59.26 | 0.105 | 0.331 |
| 13 | 12673 | 02.09.2017 – 05.09.2017 | X9.3 06.09.2017 | 223.86 | 0.102 | 0.476 |

Основная информация об исследуемых АО представлена в таблице 1. Указан номер области по классификации NOAA (второй столбец таблицы), время ее мониторинга (третий столбец). Для ми-

¹ <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html>

² <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/full>

³ <https://tesis.xras.ru>

нилизации ошибок в вычислении градиента магнитного поля, обусловленных эффектом проекции, время мониторинга каждой области ограничивалось временным интервалом нахождения ее в пределах $\pm 35^\circ$ относительно центрального солнечного меридиана (3–5 суток). В четвертом столбце таблицы указан рентгеновский класс и дата наиболее мощной вспышки, зафиксированной в анализируемой области за время ее нахождения на видимом диске Солнца. Пятый столбец — вспышечный индекс активной области (Flare index, FI, [Abramenko, 2005](#)) – параметр, характеризующий вспышечную продуктивность АО. Вспышечный индекс равен 1.0 (100.0), если в АО ежедневно за время ее нахождения на видимом диске Солнца происходит одна вспышка рентгеновского класса C1.0 (X1.0). Величина FI вычисляется за все время нахождения области на видимом диске Солнца. Последние два столбца таблицы содержат информацию о величинах параметров поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля в исследуемых областях – усредненной за время мониторинга (усреднение по времени обозначено горизонтальной чертой сверху) средней величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля (шестой столбец) и усредненной за время мониторинга области максимальной величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля между парами пятен в АО (седьмой столбец). Более детально об этих параметрах будет сказано ниже в разделе 3.

Все области, представленные в таблице 1, разделены на три подгруппы: области с низкой вспышечной активностью, области с высокой активностью и области с дополнительным всплытием магнитного потока. В каждой подгруппе таблицы АО расположены в хронологическом порядке.

3 Результаты

3.1 Первый подход к вычислению поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля: особенности и основные результаты

Первый подход к вычислению поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля (обозначим ее как $\nabla_{\perp} B_z$) – современный. Для его реализации необходимы магнитографические данные распределения вертикальной (B_z) компоненты вектора магнитного поля на заданном уровне солнечной атмосферы высокого пространственного разрешения. Для расчета величины градиента поля используется стандартная формула

$$\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle = \sqrt{\left(\frac{\partial B_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y}\right)^2}. \quad (1)$$

Производные $\frac{\partial B_z}{\partial x}$ и $\frac{\partial B_z}{\partial y}$ были рассчитаны с применением формул приближенного вычисления. Здесь применена формула вычисления производной по пяти точкам (пикселям на магнитограмме):

$$f'(x_0) \approx \frac{-f(x_0 + 2h) + 8f(x_0 + h) - 8f(x_0 - h) + f(x_0 - 2h)}{12h}, \quad (2)$$

где x_0 – пиксел, в котором необходимо вычислить значение производной, h – шаг дифференцирования, равный в нашем случае размеру пиксела на магнитограмме. Величина градиента магнитного поля вычисляется в единицах Гс км⁻¹. Следует отметить, что выбор окна дифференцирования в пять точек (пикселов) не случаен и представляет собой некий компромисс: при дифференцировании с использованием малого количества точек получаемые результаты будут сильно зашумлены, а при дифференцировании по большому количеству точек будет потеряна часть значимой информации.

Реализация первого подхода позволяет построить детализированную карту распределения величины $\nabla_{\perp} B_z$ на заданном уровне солнечной атмосферы. Пример подобной карты, вычисленный на основании данных о пространственном распределении на уровне фотосферы Солнца B_z -компоненты вектора магнитного поля, представлен на рис. 1. Жирной белой кривой на рис. 1 обозначены границы АО (стандартная маска bitmap, поставляемая с пакетом магнитографических данных инструмента HMI/SDO) на прямоугольной SHARP-магнитограмме. Параметры величины $\nabla_{\perp} B_z$ вычислялись только в пикселях, находящихся внутри жирной белой кривой.

Следует заметить, что аналогичные представленной на рис. 1 карты распределения величины градиента продольного магнитного поля ранее размещались в свободном доступе на сайте solarmonitor.org (рис. 2). Эти данные предоставлялись сетью телескопов GONG (Global Oscillation

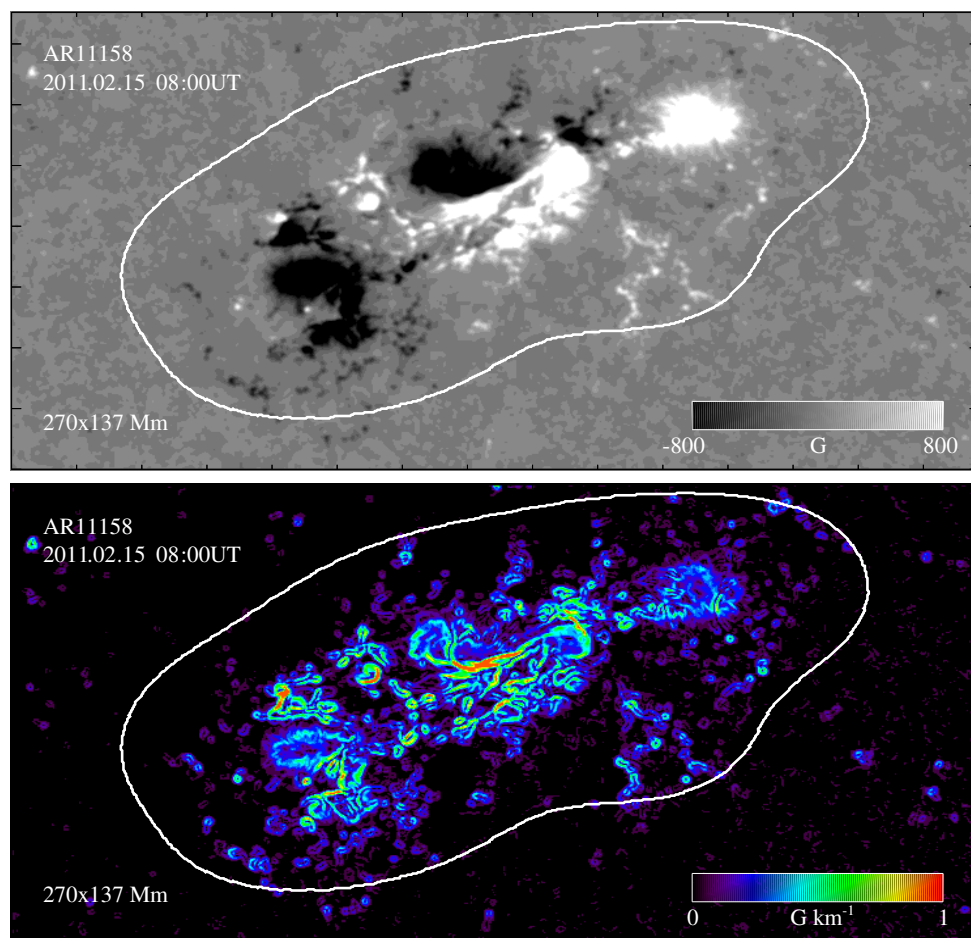


Рис. 1. Вверху – карта распределения вертикальной компоненты (B_z) вектора магнитного поля на уровне солнечной фотосферы (данные HMI/SDO) для области NOAA 11158 на момент времени 08:00 UT 15 февраля 2011 года; внизу – построенная на ее основании карта пространственного распределения поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\nabla_{\perp} B_z$

Network Group). Однако приблизительно с середины 2011 года информация о градиенте продольного магнитного поля стала недоступной на вышеуказанном интернет-ресурсе.

В качестве базового параметра, описывающего градиент продольного магнитного поля, была выбрана средняя по АО величина поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$. Данный параметр вычислен для каждой АО анализируемой выборки и для каждой магнитограммы за время мониторинга области. Временные изменения величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ сопоставлены в каждом случае с динамикой вспышечной продуктивности АО. Несколько типичных графиков представлено на рис. 3 и рис. 4. На рис. 3 показана динамика величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ для трех АО с низкой активностью, на рис. 4 – трех областей с высокой активностью. Также на графиках показана динамика величины магнитного потока (серая двойная кривая) и данные космического аппарата GOES-15 о потоке рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å на орбите Земли (синяя кривая). Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек (рентгеновского класса выше M5.0), ассоциированных с исследуемой АО за время ее мониторинга.

Из графиков, представленных на рис. 3 и рис. 4, видно следующее:

1. Величина $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ имеет незначительный разброс для АО анализируемой выборки. Так, исходя из данных, приведенных в шестом столбце таблицы 1, в котором указаны значения усредненной за время мониторинга области величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \overline{\nabla_{\perp} B_z} \rangle$, видно, что максимальное (0.120 Гс км^{-1} для области NOAA 12192) и минимальное (0.070 Гс км^{-1} для области NOAA 11899) значения параметра $\langle \overline{\nabla_{\perp} B_z} \rangle$ раз-

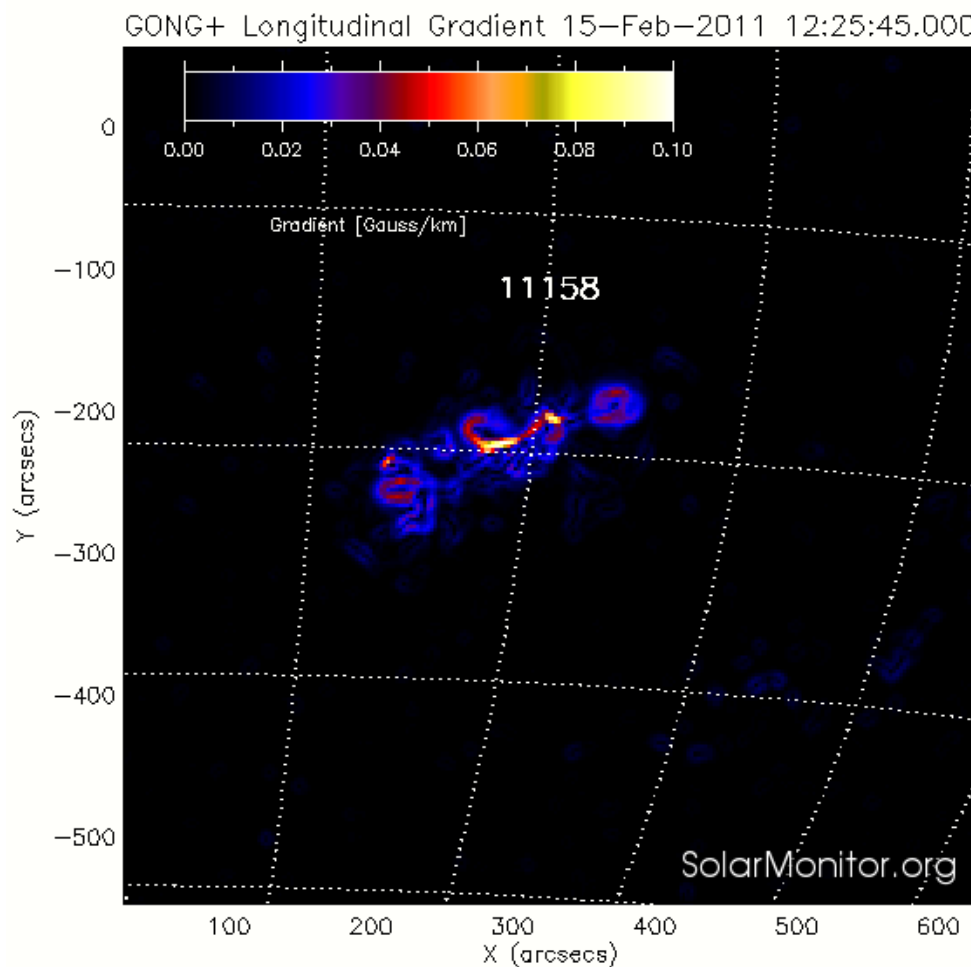


Рис. 2. Карта пространственного распределения градиента продольного магнитного поля в области NOAA 11158 на момент времени 12:45 UT 15 февраля 2011 года, вычисленная на основе данных сети телескопов GONG и размещенная на сайте solarmonitor.org

личаются в 1.7 раза. Если же рассчитать среднее для всей выборки АО значение величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, которое равно 0.092 Гс км^{-1} , то разброс значений относительно среднего не превышает 30%. Очевидно, это можно объяснить тем, что области с низкой активностью часто занимают существенно меньшую площадь и имеют более слабый магнитный поток по сравнению с областями с высокой вспышечной продуктивностью. В то же время при вычислении усредненного параметра, которым и является величина $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, как раз идет привязка к площади АО, поскольку выполняется деление на количество пикселей, которую область занимает, в результате чего численные значения параметра $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ мало различаются для областей с низкой и высокой активностью. Вероятно, в дальнейших исследованиях по данной тематике необходимо будет использовать иной параметр, который бы характеризовал градиент продольного магнитного поля и в то же время не зависел от площади АО.

2. Несмотря на незначительный разброс параметра $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, эта величина все же систематически больше в областях с высокой активностью (см. шестой столбец таблицы 1).
3. Условную границу величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ между областями с низкой активностью и вспышечно-продуктивными АО можно провести приблизительно по уровню 0.08 Гс км^{-1} (минимальные значения, характерные для области NOAA 11283 с высокой активностью). На графиках рис. 3 и рис. 4 этот уровень обозначен красным пунктиром с длинным штрихом.

Также крайне интересно было бы посмотреть, как ведет себя величина $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ в областях с активным всплытием магнитного потока за время мониторинга. Таких областей проанализировано

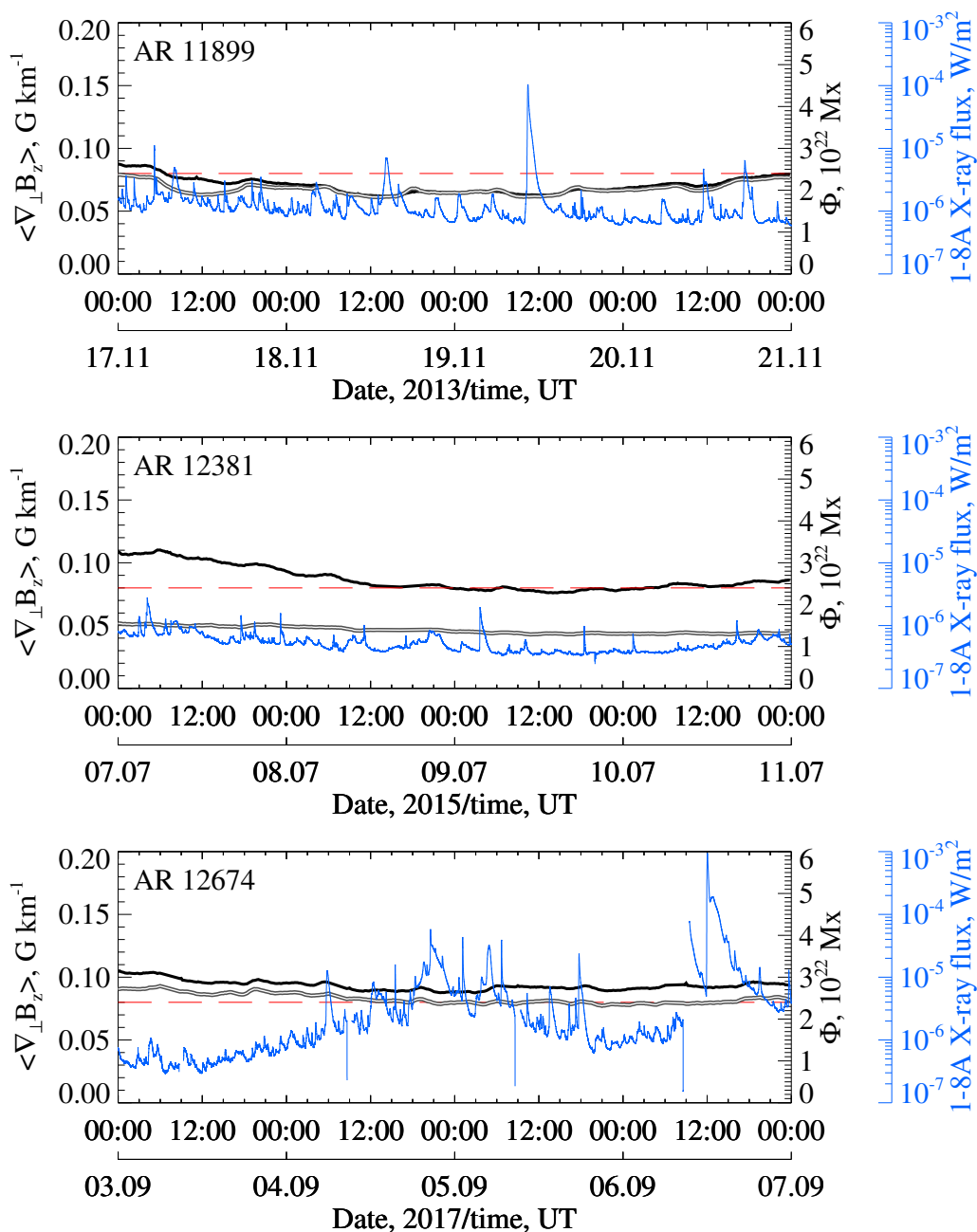


Рис. 3. Динамика магнитного потока (двойная серая кривая), средней величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ (черная кривая) и потока рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å на орбите Земли (синяя кривая) для трех областей анализируемой выборки с низкой вспышечной активностью. Красным пунктиром с длинным штрихом обозначен критический уровень величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ (более детально см. текст)

две – NOAA 11158 (февраль 2011 года) и 12673 (сентябрь 2017 года). В обоих случаях за время мониторинга АО ее магнитный поток возрастал в несколько раз по сравнению с начальным значением. Результаты анализа представлены на рис. 4.

Из графиков, представленных на рис. 5, видно, что величина $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ также нарастает приблизительно в 1.5–2 раза. Начало роста градиента магнитного поля совпадает с началом нарастания магнитного потока, однако рост величины градиента прекращается раньше, чем рост магнитного потока. Если взять определенное ранее критическое значение величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ в 0.08 Гс км^{-1} ,

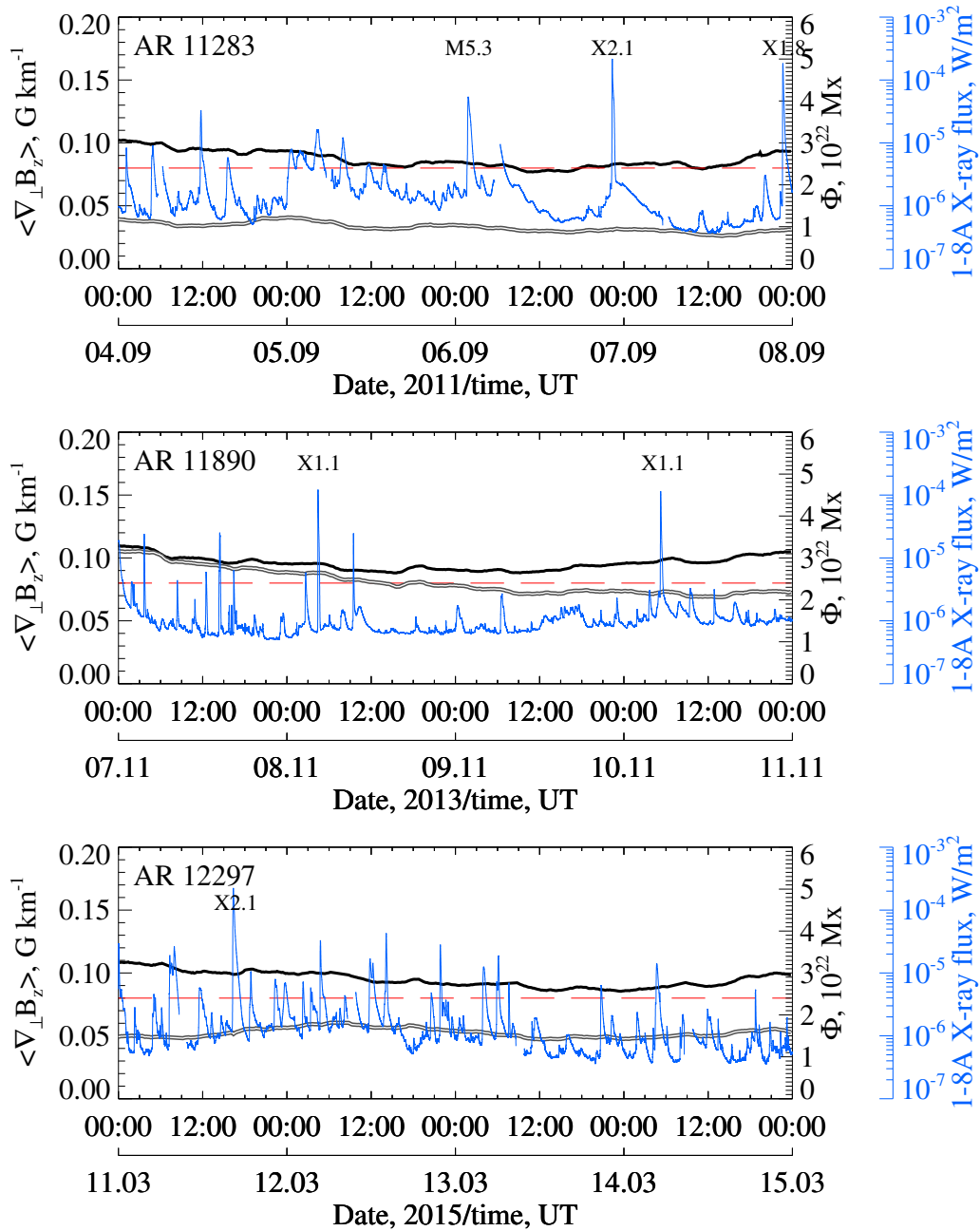


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для трех областей анализируемой выборки с высокой вспышечной продуктивностью. Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек, ассоциированных с исследуемой АО

то можно увидеть, что для областей с дополнительным всплывтием магнитного потока нарастание величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ выше критического значения происходит приблизительно за 24 часа до начала развития первых вспышечных процессов рентгеновских классов М и выше. Таким образом, данное значение может быть использовано как прогностический параметр, указывающий на возможный рост вспышечной активности АО, однако требуются дополнительные исследования на большем статистическом материале.

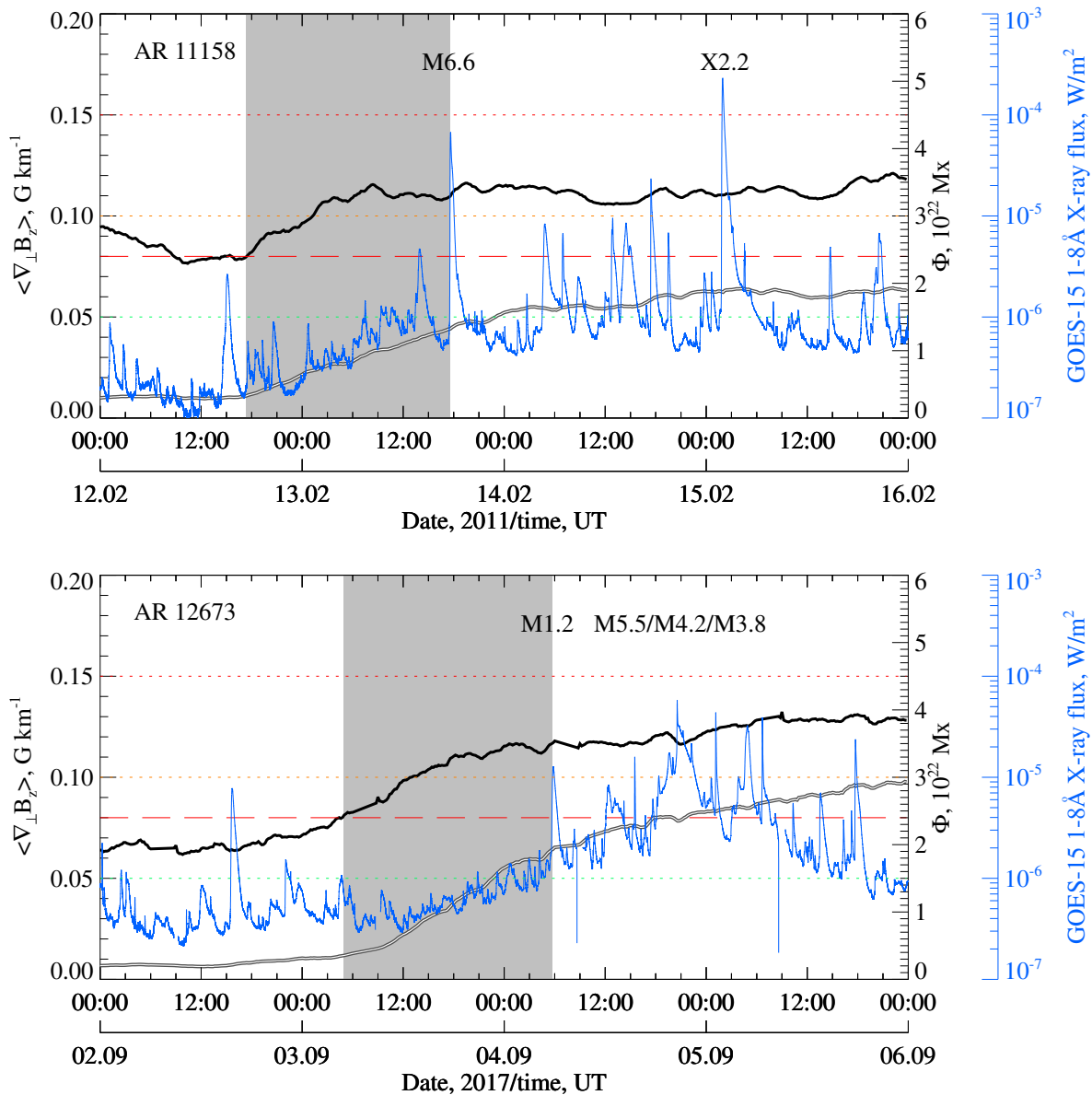


Рис. 5. Динамика магнитного потока (двойная серая кривая), средней величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ (черная кривая) и потока рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å на орбите Земли (синяя кривая) для областей NOAA 11158 и 12674 с дополнительным всплытием магнитного потока. Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек, ассоциированных с исследуемой АО. Серым выделен временной интервал между нарастанием величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ выше критического уровня (красный пунктир с длинным штрихом) и первой вспышкой рентгеновского класса M

3.2 Второй подход к вычислению поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля: особенности и основные результаты

Второй подход к вычислению $\nabla_{\perp} B_z$ можно назвать классическим, поскольку именно он применялся при вычислении градиентов продольного магнитного поля в первых работах, посвященных данной проблематике. При условии низкого пространственного разрешения, что было характерно для магнитографов ранних моделей, построить детальную карту пространственного распределения градиента продольного магнитного поля на заданном уровне невозможно. Однако можно достаточ-

но точно измерить магнитные поля в наиболее развитых пятнах АО, а также определить расстояние между ними, что позволяет вычислить градиент продольного магнитного поля между двумя пятнами, используя выражение

$$\nabla_{\perp} B_z \equiv \frac{\Delta B_z}{\Delta r} = \frac{|B_{zimax} - B_{zjmax}|}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}, \quad (3)$$

где B_{zimax} и B_{zjmax} – максимальные напряженности магнитных полей в пятнах, для которых вычисляется градиент продольного магнитного поля (в гауссах); x_i, y_i, x_j, y_j – координаты точек с максимальной напряженностью поля в пятнах; $\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \equiv r$ – расстояние между пятнами, выраженное в километрах.

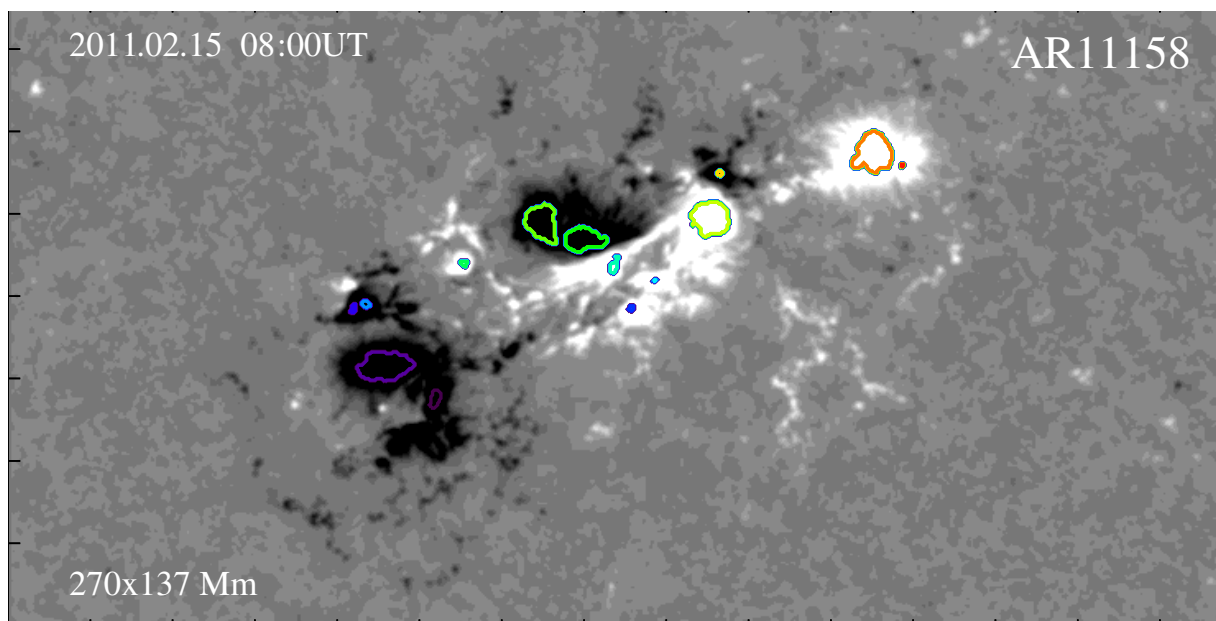


Рис. 6. Выделение отдельных пятен с напряженностью магнитного поля выше 1600 Гс (цветные контуры) на примере области NOAA 11158 анализируемой выборки

Здесь было решено проверить, насколько этот подход применим в современных реалиях с использованием данных инструментов с высоким пространственным разрешением, и сопоставить полученные результаты с данными, которые были получены с применением первого подхода и в ранних работах по рассматриваемой тематике.

Кратко о сути подхода. Пусть имеется некая АО, в которой можно выделить несколько изолированных пятен с сильными магнитными полями (рис. 6). Здесь магнитное поле подразумевается сильным, если максимальная напряженность магнитного поля в пятне превышает значение в 1600 Гс. Это значение получено следующим образом: отсекаются магнитные поля, которые ниже удвоенного значения магнитного поля, типичного для полутени развитого пятна (800 Гс). Можно было бы поступить иначе: отсечь магнитные поля ниже 1000 Гс (минимальное магнитное поле в стабильных развитых пятнах). В таком случае, помимо основных пятен, занимающих значительную площадь, мы получили бы и большое количество мелких структур. Затем потребовалось бы отсекалть мелкие пятна, площадь которых меньше n пикселей. Однако возникают проблемы с тем, какое минимальное количество пикселей должно занимать пятно, чтобы возникла необходимость его учета при вычислении градиента магнитного поля, и как аргументировать именно этот порог.

Выделив отдельные пятна в АО, далее непосредственно приступаем к вычислению градиентов между каждой парой пятен, используя выражение (3). Изначально рассчитываем градиенты продольного магнитного поля между первым пятном и последующими (красные стрелки на рис. 7), далее – между вторым пятном и последующими (зеленые стрелки на рис. 6) и т. д. Очевидно также,

что $\nabla_{\perp} B_z(1 \rightarrow 2) \equiv \nabla_{\perp} B_z(2 \rightarrow 1)$, $\nabla_{\perp} B_z(1 \rightarrow 3) \equiv \nabla_{\perp} B_z(3 \rightarrow 1)$... Поэтому величина градиента магнитного поля в таких случаях будет рассчитана только один раз.

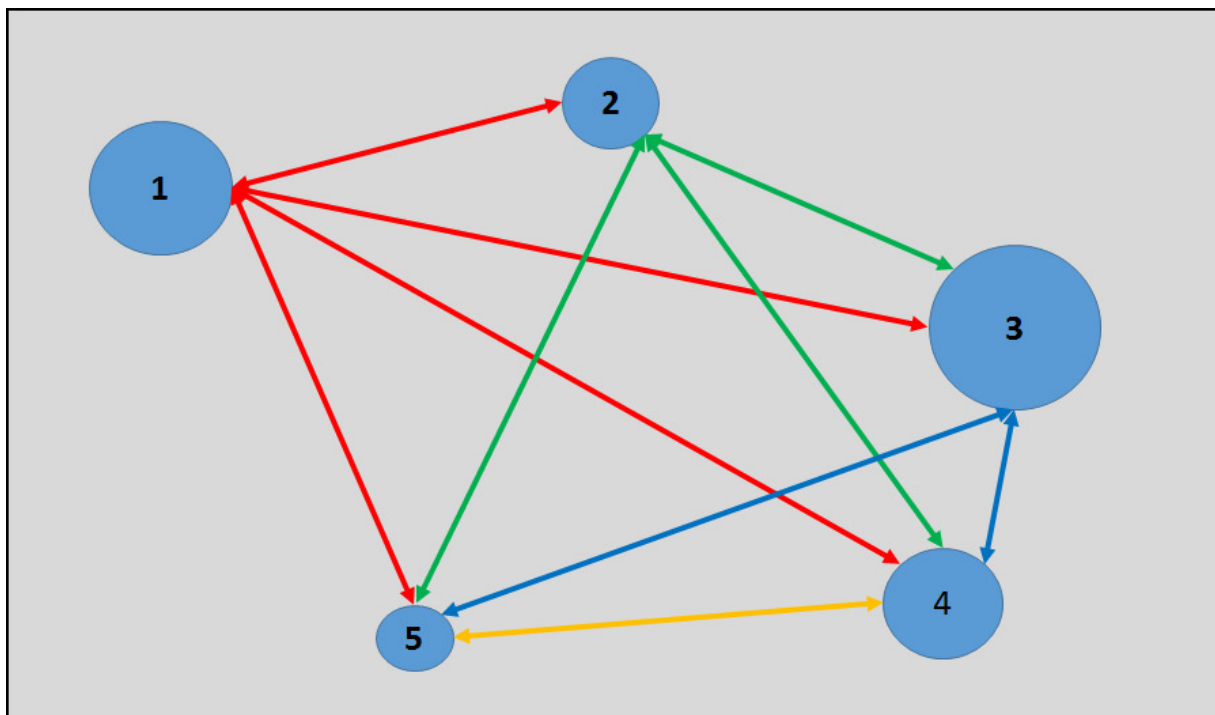


Рис. 7. К вопросу вычисления градиента продольного магнитного поля между отдельными пятнами в АО. Схематическое представление работы IDL-кода

Получив для магнитограммы исследуемой АО значения величин $\nabla_{\perp} B_z$ для всех пар пятен, мы выбираем из совокупности значений только максимальное (обозначим его как $\max(\nabla_{\perp} B_z)$) для данного момента времени. Далее строится график временных вариаций величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ для всего времени мониторинга области. Примеры таких графиков представлены на рис. 8 (области с низкой активностью) и рис. 9 (области с высокой активностью). Также показан поток рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å на орбите Земли (синяя кривая, данные космического аппарата GOES-15). Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек (рентгеновского класса не ниже M5.0), ассоциированных с исследуемой АО за время ее мониторинга.

Анализируя графики, представленные на рис. 8 и рис. 9, можно сказать следующее:

1. На графиках видно, что величина $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ для областей с низкой активностью ниже, чем в областях с высокой всплывочной продуктивностью. Особенно хорошо это заметно по данным таблицы 1, где в последнем столбце приведены значения средней за время наблюдения величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ для каждой из областей исследуемой выборки. Видно, что условную границу между областями с высокой и низкой активностью можно провести приблизительно по уровню $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ в 0.115 Гс км^{-1} .
2. На многих графиках можно заметить скачки величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)$, в отдельных случаях весьма существенные. Обусловлены они эволюцией магнитных полей в АО. Подобные скачки могут быть связаны либо с распадом одного из двух пятен, между которыми программа ранее определяла максимальное значение градиента магнитного поля, и, соответственно, переход на иную пару пятен (в этом случае наблюдается скачкообразное уменьшение величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ на графике), либо же со всплыванием нового магнитного потока и формированием пятна/пятен с достаточно высокой напряженностью магнитного поля вблизи одного из уже сформированных крупных пятен АО (наблюдается скачкообразное нарастание величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)$).

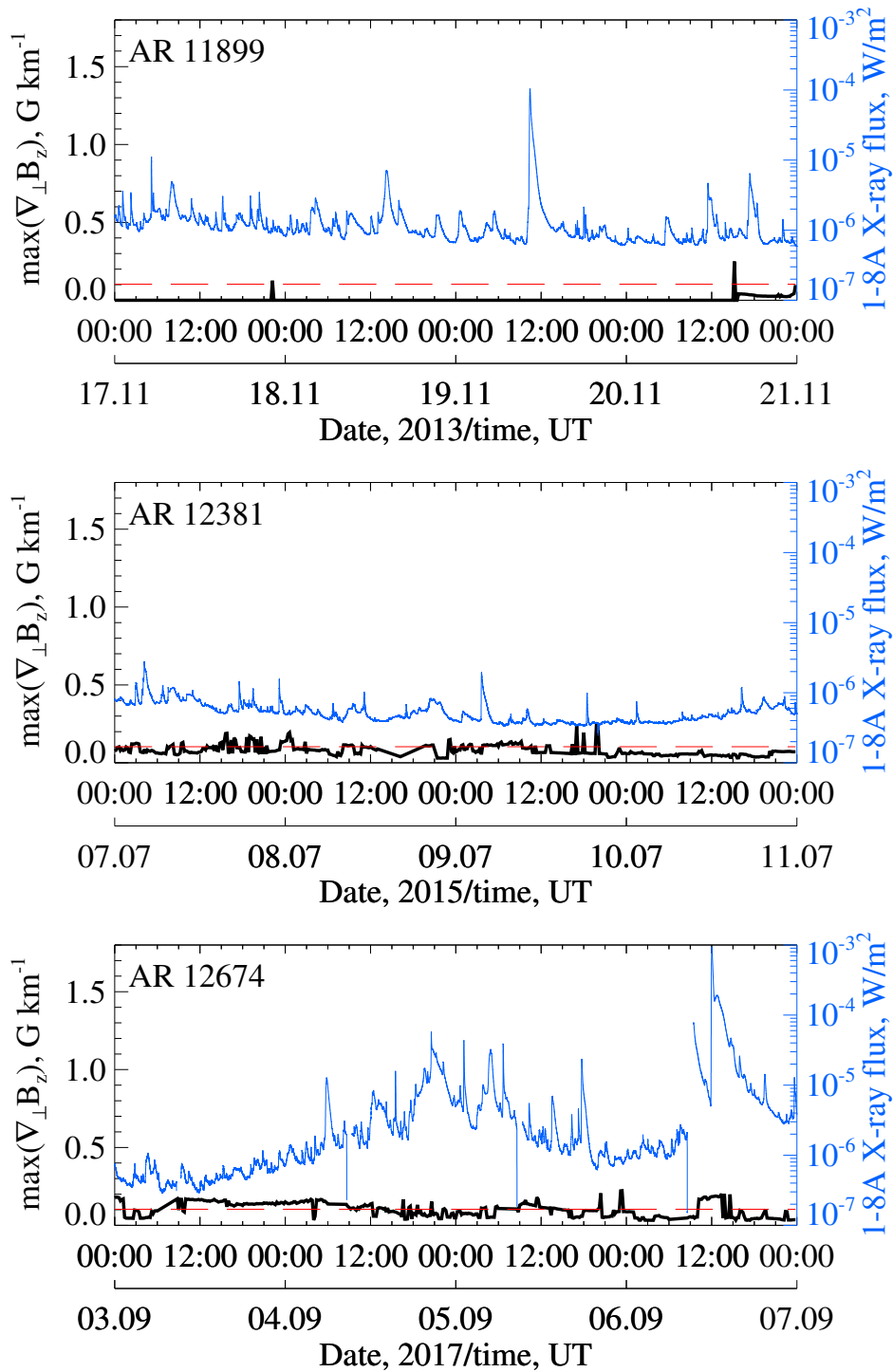


Рис. 8. Динамика максимальной величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля между пятнами в АО $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ (черная кривая) и потока рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å на орбите Земли (синяя кривая) для трех областей анализируемой выборки с низкой всплывочной активностью. Красным пунктиром с длинным штрихом обозначен критический уровень величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ (более детально см. текст)

Как и в случае применения первого подхода к вычислению величины градиента продольного магнитного поля, интересно было бы посмотреть, как ведет себя величина $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ в областях

с активным всплытием магнитного потока. Результаты представлены на рис. 10. Можно увидеть, что для обеих областей с дополнительным всплытием магнитного потока нарастание величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ выше критического значения в 0.115 Гс км^{-1} происходит приблизительно за 23–25 часов до начала развития первых вспышечных процессов рентгеновских классов M и выше.

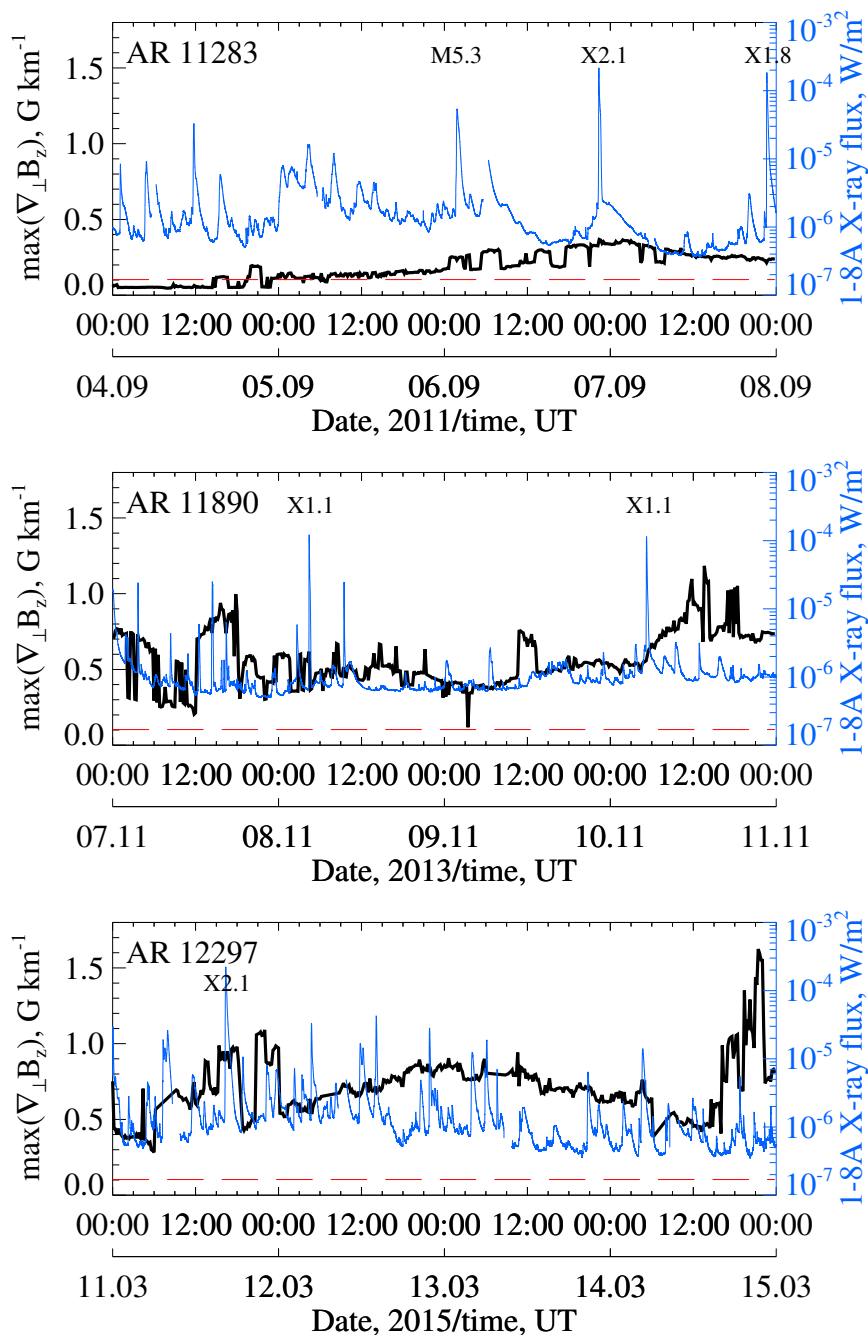


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, но для трех областей анализируемой выборки с высокой вспышечной продуктивностью. Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек, ассоциированных с исследуемой АО

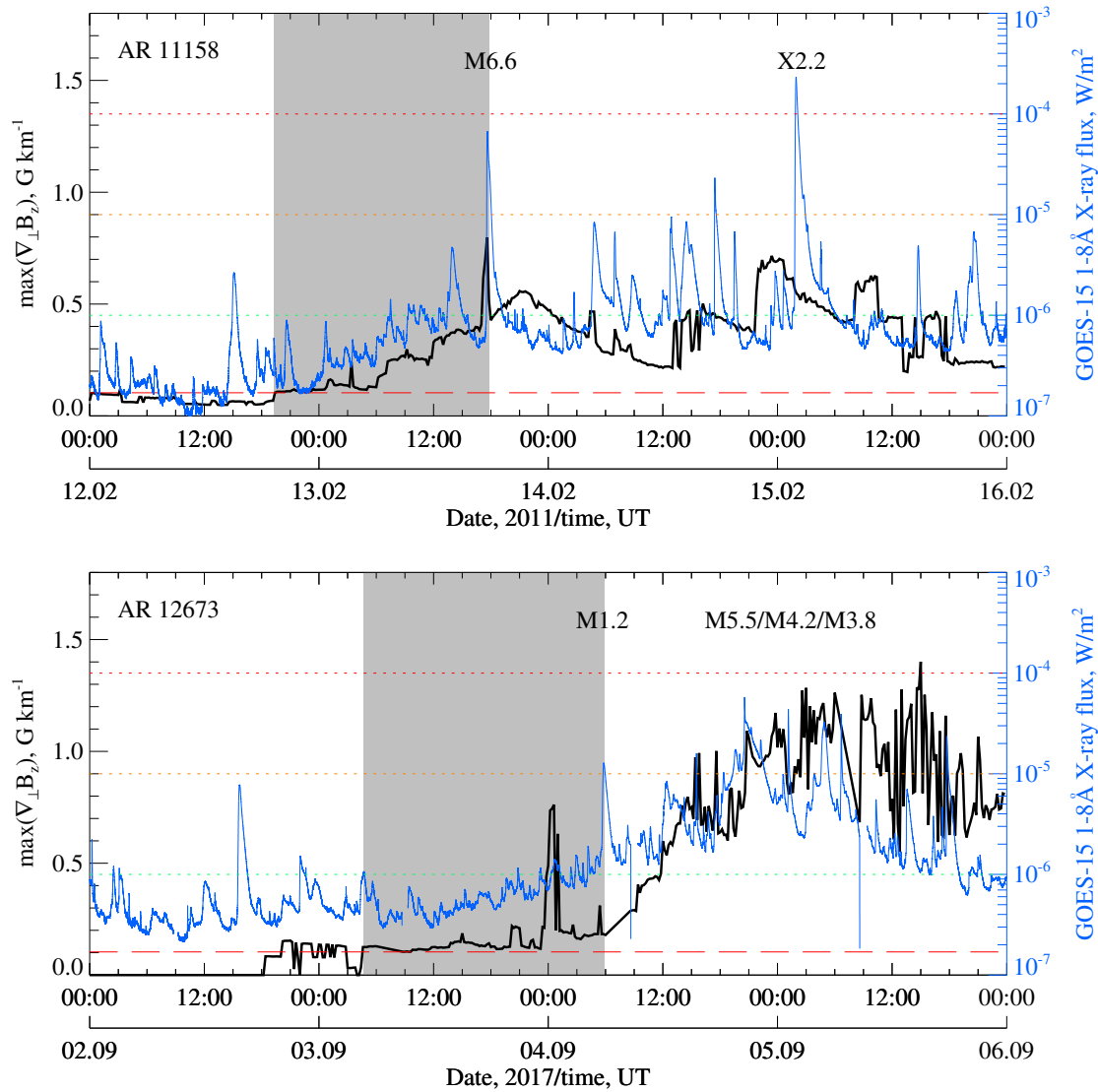


Рис. 10. Динамика максимальной величины поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля между пятнами в АО $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ (черная кривая) и потока рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å на орбите Земли (синяя кривая) для областей NOAA 11158 и 12674 с дополнительным всплывтием магнитного потока. Указаны рентгеновские классы наиболее мощных вспышек, ассоциированных с исследуемой АО. Серым выделен временной интервал между нарастанием величины $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ выше критического уровня (красный пунктир с длинным штрихом) и первой вспышкой рентгеновского класса М

3.3 Общие результаты

На основе данных, представленных в последних трех столбцах таблицы 1, были построены графики зависимости между величиной вспышечного индекса (Flare index) и параметрами, характеризующими поперечную составляющую градиента продольного магнитного поля – усредненными за время мониторинга АО величинами $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ (рис. 11 и рис. 12).

Как видно из представленных графиков, говорить о какой-либо существенной корреляции не приходится: разброс точек достаточно большой, а самих данных мало для выявления зависимости, если таковая и имеется. Этот результат дополнительно подтверждает неоднократно высказанное множеством авторов утверждение о том, что только незначительная часть энергии непотенциальных магнитных полей реализуется во вспышечных процессах. Несмотря на отсутствие корреляционной зависимости, пороговые (критические) значения параметров градиента продольного магнитного

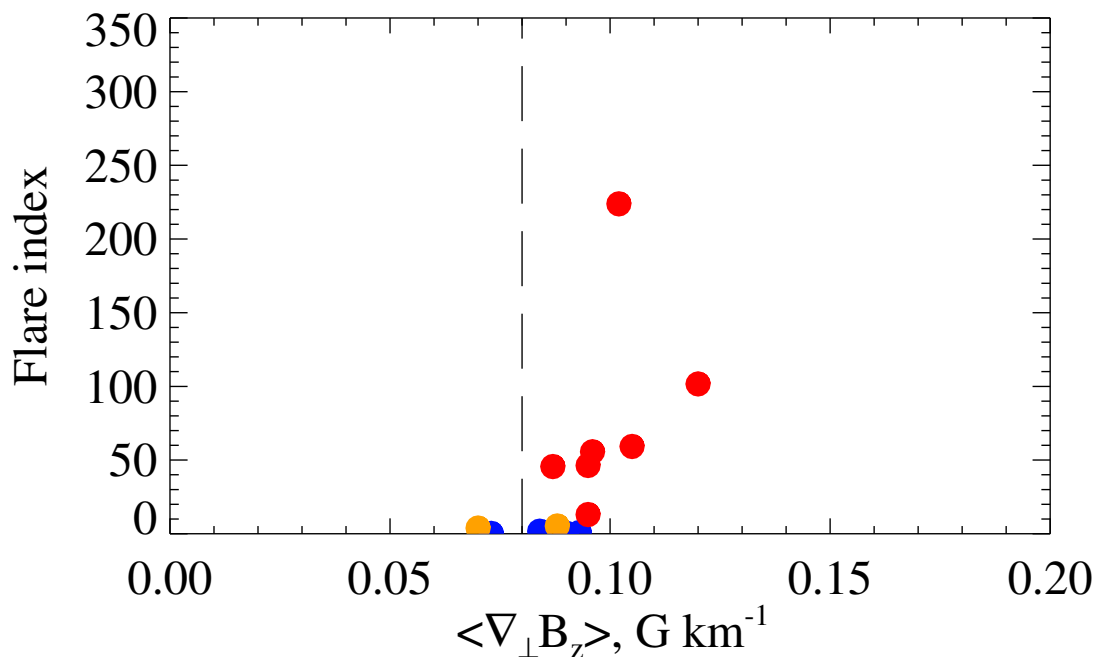


Рис. 11. График зависимости между средней величиной поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и вспышечным индексом (Flare index) для всей анализируемой выборки АО. Красными точками отмечены области, в которых были зафиксированы вспышки рентгеновского класса X, оранжевыми точками – области со вспышками класса M, синими точками – области, в которых наблюдались только вспышки рентгеновского класса C. Вертикальным штрихом показано критическое значение параметра $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$

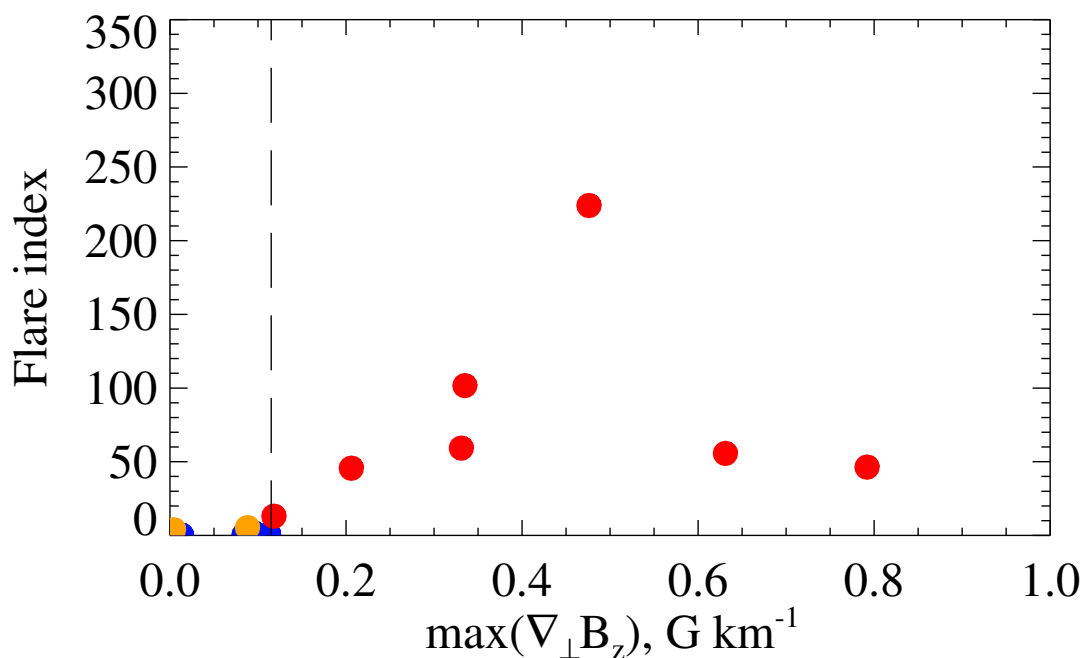


Рис. 12. График зависимости между максимальной величиной поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля между пятнами АО $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ и вспышечным индексом (Flare index) для всей анализируемой выборки АО. Обозначения те же, что и на рис. 11. Вертикальным штрихом отмечено критическое значение параметра $\max(\nabla_{\perp} B_z)$

поля себя обнаруживают. Особенно хорошо это видно для зависимости $FI - \max(\nabla_{\perp} B_z)$, где разделение между областями с низкой и высокой активностью достаточно четкое.

Заметим, что полученные критические значения как величины $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle = 0.080 - 0.085 \text{ Гс км}^{-1}$ (первый подход к вычислению градиента продольного магнитного поля), так и параметра $\max(\nabla_{\perp} B_z) = 0.110 - 0.115 \text{ Гс км}^{-1}$ (второй подход) весьма близки к значению в 0.1 Гс км^{-1} , полученному существенно раньше на основании достаточно обширного статистического материала (Северный, 1960). Разумеется, используя первый подход и применяя для анализа среднее по АО значение градиента продольного магнитного поля, мы и должны были получить величину ниже 0.1 Гс км^{-1} . Несколько удивительно было получить значение параметра $\max(\nabla_{\perp} B_z)$, мало отличающееся от значения, полученного в ранних исследованиях по данной тематике. Это говорит о тщательности измерений и вычислений, выполненных советскими астрономами: не имея магнитографов высокого пространственного разрешения, им удалось достаточно точно определить критическое значение величины градиента продольного магнитного поля.

4 Выводы и обсуждение

Изучив существующие подходы к вычислению градиентов продольного магнитного поля, рассчитав величину и проанализировав динамику поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля ($\nabla_{\perp} B_z$) для небольшой выборки из 13 АО с разным уровнем вспышечной продуктивности (6 областей с низкой, 5 областей с высокой вспышечной активностью и две АО с высокой активностью и дополнительным всплытием магнитного потока), автор делает следующие выводы:

1. Первый подход к вычислению градиента продольного магнитного поля может быть использован только на данных современных инструментов для изучения Солнца с высоким пространственным разрешением. Подход предполагает расчет градиентов фактически между соседними пикселями на магнитограмме. Это позволяет строить детальные карты пространственного распределения величины $\nabla_{\perp} B_z$ на заданном уровне солнечной атмосферы, находить вероятные места возникновения и развития вспышечных процессов в АО.
2. В рамках первого подхода становится возможным расчет средних или интегральных параметров, которые могут характеризовать градиент продольного магнитного поля. Здесь в качестве подобного параметра выбрана средняя по АО величина поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$. Изучение параметра $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ в областях исследуемой выборки показало, что, несмотря на небольшие различия, его величина систематически больше в областях с высокой вспышечной продуктивностью.
3. Анализ динамики параметра $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ за время мониторинга исследуемых областей позволил обнаружить пороговое значение этой величины, равное приблизительно 0.08 Гс км^{-1} и определяемое как минимальное значение для группы анализируемых областей с высокой активностью.
4. Второй подход к вычислению градиентов продольного магнитного поля (классический) предполагает расчет величины $\nabla_{\perp} B_z$ между отдельными пятнами в АО. Данный подход не позволяет строить детализированные карты распределения величины $\nabla_{\perp} B_z$, однако его преимуществом является возможность применения на магнитографических данных как высокого, так и низкого пространственного разрешения.
5. Параметром, характеризующим градиенты продольного магнитного поля в рамках второго подхода, является величина $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ – максимальное значение поперечной составляющей градиента продольного магнитного поля среди пар пятен для заданной области и заданного момента времени. Изучение динамики параметра $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ показало наличие резких скачков этой величины, которые обусловлены эволюционными изменениями магнитных полей в АО. Также обнаружено, что величина $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ имеет более высокие значения в областях с высокой вспышечной продуктивностью. Выявлено критическое значение параметра $\max(\nabla_{\perp} B_z)$, равное приблизительно 0.115 Гс км^{-1} .
6. Исследование областей с дополнительным всплытием магнитного потока показало, что первые вспышки рентгеновских классов М и выше возникают на временной шкале 23–25 часов после превышения параметрами $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ и $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ критических значений.

Следует также заметить, что полученные здесь характерные времена задержки между нарастающим параметром градиента продольного магнитного поля и первыми вспышечными событиями высоких рентгеновских классов в 23–25 часов, очевидно, имеют фундаментальное значение, поскольку

многие параметры АО претерпевают изменения (иногда – скачкообразные) приблизительно за 0.5–2 суток до первых мощных вспышек. Так, в работе Смольков и др. (2011) было отмечено возникновение ярких нейтральных источников микроволнового излучения в АО приблизительно за двое суток до мощных вспышечных событий. В исследованиях Абраменко (2016) показано, что наклон спектра мощности в АО меняется и имеет локальный максимум приблизительно за 0.6–1.9 дня до вспышки. В работе Fursyak et al. (2020) обнаружена временная задержка в 20 часов между нарастанием средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока $\langle |j_z| \rangle$ выше критического значения в 2.7 MA m^{-2} и первыми мощными вспышками в АО. О характерном времени в 0.5–2 суток передачи накопленной энергии из фотосферы в корону и создании там критической ситуации говорят и ряд других исследований (см, напр., Pustil'nik, 2001; Strugarek et al., 2014; Гершберг, 2015).

Данная работа является первой из цикла исследований и нацелена на определение параметров, которые могли бы характеризовать градиенты продольного магнитного поля в АО и динамику которых можно было бы сопоставить с уровнем и временными вариациями вспышечной продуктивности области. В рамках второго подхода к вычислению градиента магнитного поля параметр $\text{max}(\nabla_{\perp} B_z)$, вероятно, выбран удачно, поскольку можно легко определить пороговое значение и разделить области с высокой и низкой активностью. Параметр $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, выбранный как базовый в рамках первого подхода, очевидно, требуется заменить на иной, который бы в значительно меньшей степени зависел от площади, занимаемой АО. Также очевидно, что требуются дополнительные исследования с набором статистического материала, чтобы подтвердить полученные здесь результаты.

Работа выполнена при поддержке НИР № 1021051101548-7-1.3.8 “Физика Солнца и его активность на разных временных и пространственных масштабах”.

Автор публикации благодарит рецензента за интерес к статье и полезные замечания, которые в значительной степени помогли улучшить данную работу.

Литература

- Абраменко В.И., 2016. Турбулентная и мультифрактальная природа солнечного магнетизма (Дис. докт. физ.-матем. наук). Научный. [Abramenko V.I., 2016. Turbulent and multi-fractal nature of solar magnetism (Dr. Sci. thesis). Nauchny. (In Russ.)]
- Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М., 1982. Солнечные вспышки. М.: Наука. [Altyn'tsev A.T., Banin V.G., Kuklin G.V., Tomozov V.M., 1982. Solar Flares, M.: Nauka. (In Russ.)]
- Барановский Е.А., Степанов В.Е., 1959. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 21. С. 180–189. [Baranovskii E.A., Stepanov V.E., 1959. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 21, pp. 180–189. (In Russ.)]
- Брунс А.В., Никулин Н.С., Северный А.Б., 1965. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 33. С. 80–85. [Bruns A.V., Nikulin N.S., Severnyi A.B., 1965. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 33, pp. 80–85. (In Russ.)]
- Гершберг Р.Е., 2015. Активность солнечного типа звезд главной последовательности. Симферополь: Антиква. [Gershberg R.E., 2015. Solar-Type Activity in Main-Sequence Stars, Simferopol': Antikva. (In Russ.)]
- Гопасюк С.И., Огирь М.Б., Северный А.Б., Шапошникова Е.Ф., 1963. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 29. С. 15–67. [Gopasyuk S.I., Ogir' M.B., Severnyi A.B., Shaposhnikova E.F., 1963. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 29, pp. 15–67. (In Russ.)]
- Зверева А.М., Северный А.Б., 1970. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 41–42. С. 97–157. [Zvereva A.M., Severnyi A.B., 1970. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 41–42, pp. 97–157. (In Russ.)]
- Июшпа Б.А., Могилевский Э.И., 1965. Солн. активность. № 2. С. 118–130. [Ioshpa B.A., Mogilevskii E.I., 1965. Soln. aktivnost', no. 2, pp. 118–130. (In Russ.)]
- Июшпа Б.А., Обридко В.Н., 1965. Солн. данные. № 3. С. 54–58. [Ioshpa B.A., Obridko V.N., 1965. Soln. dannye, no. 3, pp. 54–58. (In Russ.)]
- Ихсанов Р.Н., Платонов Ю.П., 1967. Солнечные данные. № 11. С. 78–89. [Ikhsanov R.N., Platonov Yu.P., 1967. Solnechnye dannye, № 11, pp. 78–89. (In Russ.)]
- Кузнецов Д.А., Куклин Г.В., Степанов В.Е., 1966. Результаты наблюдений и исследований в период МГСС. Вып. 1. С. 80–87. [Kuznetsov D.A., Kuklin G.V., Stepanov V.E., 1966. Rezul'taty nablyudenii i issledovaniy v period MGSS, iss. 1, pp. 80–87. (In Russ.)]
- Котов В.А., 1970. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 41–42. С. 67–88. [Kotov V.A., 1970. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 41–42, pp. 67–88. (In Russ.)]

- Никулин Н.С., 1967. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 36. С. 76–86. [Nikulin N.S., 1967. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 36, pp. 76–86. (In Russ.)]
- Никулин Н.С., Северный А.Б., Степанов В.Е., 1958. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 19. С. 3–19. [Nikulin N.S., Severnyi A.B., Stepanov V.E., 1958. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 19, pp. 3–19. (In Russ.)]
- Северный А.Б., 1956. Астрон. журн. Вып. 33. С. 74–79. [Severnyi A.B., 1956. *Astron. zhurn.*, iss. 33, pp. 74–79. (In Russ.)]
- Северный А.Б., 1957. Астрон. журн. Вып. 34. С. 684–693. [Severnyi A.B., 1957. *Astron. zhurn.*, iss. 34, pp. 684–693. (In Russ.)]
- Северный А.Б., 1958. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 20. С. 22–51. [Severnyi A.B., 1958. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 20, pp. 22–51. (In Russ.)]
- Северный А.Б., 1960. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 22. С. 12–41. [Severnyi A.B., 1960. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 22, pp. 12–41. (In Russ.)]
- Северный А.Б., 1965. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 33. С. 3–33. [Severnyi A.B., 1965. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 33, pp. 3–33. (In Russ.)]
- Северный А.Б., 1988. Некоторые проблемы физики Солнца. М.: Наука. [Severnyi A.B., 1988. *Some Problems of Solar Physics*, M.: Nauka. (In Russ.)]
- Смольков Г.Я., Максимов В.П., Просовецкий Д.В., Уралов А.М., Бакунина И.А. и др., 2011. Солнечно-земная физика. Вып. 18. С. 74–78. [Smol'kov G.Ya., Maksimov V.P., Prosovetskii D.V., Uralov A.M., Bakunina I.A. i dr., 2011. *Solnechno-zemnaya fizika*, iss. 18, pp. 74–78. (In Russ.)]
- Abramenko V.I., 2005. *Astrophys. J.*, vol. 629, no. 2, pp. 1141–1149.
- Avignon Y., Martres M.J., Pick M., 1964. *Ann. Astrophys.*, vol. 27, pp. 23–28.
- Babcock H.W., 1953. *Astrophys. J.*, vol. 118, pp. 387–396.
- Bobra M.G., Sun X., Hoeksema J.T., Turmon M., Liu Y., et al., 2014. *Solar Phys.*, vol. 289, pp. 3549–3578.
- Caroubalos C., 1964. *Ann. Astrophys.*, vol. 27, pp. 333–388.
- Fursyak Yu.A., Abramenko V.I., Kutsenko A.S., 2020. *Astrophysics*, vol. 63, no. 2, pp. 260–273.
- Hale G.E., 1908. *Astrophys. J.*, vol. 28, pp. 315–343.
- Houtgast J., van Sluiter A., 1948. *Bull. Astron. Inst. Netherl.*, vol. 10, pp. 325–333.
- Kosugi T., Matsuzaki K., Sakao T., Shimizu T., Sone Y., et al., 2007. *Solar Phys.*, vol. 243, pp. 3–17.
- Lee R.H., Rust R.M., Zirin H., 1965. *Applied Optics IP*, vol. 4, pp. 1081–1084.
- Leroy J.L., 1962. *Ann. Astrophys.*, vol. 25, pp. 127–165.
- Livingston W.C., 1968. *Astrophys. J.*, vol. 153, pp. 929–942.
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, pp. 3–15.
- Pustil'nik L., 2001. *Proc. of the 27th International Cosmic Ray Conference*, pp. 3250–3253.
- Severny A.B., Stepanyan N.N., Steshenko N.V., 1979. *NOAA Solar-Terrest. Prediction Proc.*, vol. 1, pp. 72–88.
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., Kosovichev A.G., Bogart R.S., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, pp. 207–227.
- Strugarek A., Charbonneau P., Joseph R., Pirot D., 2014. *Solar Phys.*, vol. 289, pp. 2993–3015.

A transverse component of the longitudinal magnetic field gradient in active regions with different levels of flare productivity: different approaches to calculating, dynamics and probable critical values

Yu.A. Fursyak

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
yuriy_fursyak@mail.ru

Abstract. The study aims to analyze the value and dynamics of the transverse component of the longitudinal magnetic field gradient in active regions (ARs) with different levels of flare productivity. We used magnetographic data from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument aboard the Solar Dynamics Observatory (SDO) of the spatial distribution of the B_z component of the magnetic field vector at the solar photosphere level. Thirteen ARs were selected for analysis: 6 ARs with low activity and 7 ARs with high activity; two of them are regions with an additional increase of the magnetic flux. Monitoring of each of the ARs was carried out for 3–5 days within 30–35 heliographic degrees relative to the central meridian. Two approaches to calculating the longitudinal magnetic field gradient are considered: modern, requiring the magnetographic data of high spatial resolution, and classical. For each approach, the parameters characterizing the longitudinal magnetic field gradient in the AR were determined. For the modern approach, this is the average value of the transverse component of the longitudinal magnetic field gradient $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$ over the AR; for the classical approach, this is the maximum value of the transverse component of the longitudinal magnetic field gradient for a set of the pairs of spots in the AR ($\max(\nabla_{\perp} B_z)$). The dynamics of the chosen parameters was compared with the level of AR flare productivity. It is shown that: (1) There are threshold values of the parameters that describe the longitudinal magnetic field gradient of the AR. For the quantity $\langle \nabla_{\perp} B_z \rangle$, the critical value is 0.08 G km^{-1} , and for the parameter $\max(\nabla_{\perp} B_z)$ it is 0.115 G km^{-1} . (2) The first powerful flares of M or above roentgen classes are observed in the AR 23–25 hours after the above parameters exceed the corresponding critical values.

Key words: Sun, magnetic fields, active regions, solar activity